

پیش‌بینی و تعیین پارامترهای تاثیرگذار بر افت انرژی موضعی سیستم‌های کالورت با استفاده از روش هوشمند الگوریتم تکاملی

کیومرث روشنگر^{۱*}، غزاله نساجی متین^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲۱

چکیده

به منظور انتقال آب از یک سمت خاکریز به سمت دیگر آن از سازه‌های به نام کالورت استفاده می‌شود. کالورت‌ها در انواع مقاطع هندسی مختلف کاربرد داشته و علی‌رغم ظاهر ساده آن‌ها طراحی این سازه‌ها نیاز به انجام محاسبات دقیق داشته و عملکرد آن‌ها از پارامترهای مختلفی تاثیر می‌پذیرد. تخمین دقیق افت انرژی در کالورت نقش مهمی در طراحی بهینه سیستم‌های کالورت دارد. در این مقاله برای مدل‌سازی ضریب افت انرژی موضعی در کالورت‌ها با هندسه‌های مختلف (دایروی و مستطیلی شکل)، جهت شبیه‌سازی و تخمین ضریب افت انرژی موضعی، مدل‌های متعدد با ورودی‌های مختلفی تعریف گردید و نتایج حاصله ۱- کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) را در تخمین ضریب افت انرژی موضعی سیستم‌های کالورت به اثبات رسانید، ۲- مشخص گردید که مدل با پارامترهای ورودی (Fr, θ) در تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر و مدل با پارامترهای ورودی $(Fr, \frac{Hw}{D})$ در تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی دارای بیش‌ترین دقت هستند. معیارهای ارزیابی $(R, DC, RMSE)$ در مدل برتر تست مربوط به پیش‌بینی ضریب افت موضعی ناشی از وجود خم در مسیر برابر $(0.972, 0.943, 0.074)$ و معیارهای ارزیابی در مدل برتر تست مربوط به پیش‌بینی ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی برابر با $(0.962, 0.92, 0.04)$ می‌باشد. هم‌چنین مطابق با نتایج آنالیز حساسیت، پارامتر θ در تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر و پارامتر $\frac{Hw}{D}$ در تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی بیش‌ترین تاثیر را داشتند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، ضریب افت انرژی موضعی، کالورت، مدل‌های هوشمند

مقدمه

تصمیم‌گیری در مورد ساخت، تعیین اندازه، شکل و قطر کالورت می‌باشد. در سیستم‌های کالورت هرچه افت انرژی کم‌تر باشد تاثیر آن بر پروفیل سطح جریان بالادست کم‌تر است. افت انرژی به دو دسته افت انرژی طولی و افت انرژی موضعی تقسیم‌بندی می‌شود که در سیستم‌های کالورت بدلیل طول کم، افت انرژی طولی ناچیز بوده و افت موضعی بیش‌تر به چشم می‌خورد. تخمین دقیق میزان افت انرژی موضعی می‌تواند عامل مهمی در صرفه‌جویی هزینه‌ها و زمان طراحی و اجرای سیستم‌های کالورت باشد اما بدلیل وجود عدم قطعیت در این مورد و هم‌چنین تاثیر متفاوت پارامترهای مختلف بر افت انرژی موضعی، تعیین دقیق روابط حاکم بر این پدیده مشکل می‌باشد. تاکنون در مورد افت انرژی موضعی در سیستم‌های کالورت مطالعات متعددی صورت گرفته و هندسه‌های مختلف کالورت بررسی شده‌اند. تویلیس با بررسی افت موضعی ناشی از دهانه ورودی در کالورت‌های نیمه مدفون دایروی شکل، ۴ شکل دهانه ورودی مختلف در کالورت را بررسی کرد و با محاسبه ضرایب افت انرژی ناشی از دهانه ورودی، مناسب‌ترین مقطع را از نقطه نظر کم‌ترین اتلاف تعیین

به‌منظور انتقال آب از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آن می‌توان به استفاده از نیروی ثقل و به حرکت در آوردن آب اشاره کرد. کالورت‌ها نیز از جمله سازه‌هایی هستند که به همین منظور در مواردی که مسیر انتقال آب با جاده یا راه آهن مواجه است بکار گرفته می‌شوند. کالورت‌ها از لحاظ شکل هندسی در انواع مختلفی بکار می‌روند که از جمله آن‌ها می‌توان به کالورت مستطیلی و دایروی شکل اشاره کرد. مناسب‌ترین طراحی کالورت اندازه کوچک‌ترین کالورتی بود که بتواند با کم‌ترین هزینه دبی طراحی را بخوبی از خود عبور دهد. آگاهی از میزان افت انرژی جریان در کالورت از جمله اطلاعات لازم هر پروژه و از عوامل

۱ - دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲ - کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه

تبریز

(Email: roshangari@tabrizu.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

کرد. وی مشاهده کرد که ضرایب افت انرژی موضعی در دهانه ورودی کالورت‌های نیمه‌مدفون بزرگ‌تر از کالورت‌های متداول می‌باشد. (Tullis., 2012). مالن و پار با آزمایش بر روی کالورت‌های مستطیلی شکل دارای خم در مسیر، افت موضعی در ۴ زاویه خم متفاوت در مسیر را تحت بررسی قرار دادند افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم را بصورت تجربی محاسبه کرده و آن را تابعی از زاویه خم و عدد فرود معرفی کردند و نمودارها و جداولی را به‌منظور محاسبه این مورد ارائه دادند (Malone and Parr., 2008). رابینسون با بررسی افت انرژی موضعی در کالورت‌های بیضی شکل، ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی و تاثیر پارامترهایی از قبیل عدد رینولدز و قطر نسبی کالورت بر این ضریب را بررسی کرده و روش دقیقی را برای محاسبه افت موضعی در خروجی کالورت ارائه دادند و بهترین مقطع کالورت با کم‌ترین افت را مشخص کردند. (Robinson., 2005). گرازینو و همکاران آزمایشاتی به‌منظور محاسبه ضریب افت انرژی موضعی در کالورت‌های پیش ساخته مربعی شکل انجام داده و نتایج را بصورت نمودارها و جداول ارائه کردند (Grazino et al., 2001). اندرسون آزمایشاتی در مورد کالورت‌های فرسوده و جاسازی کالورت‌های جدید داخل آن‌ها انجام داده و افت موضعی را بصورت تجربی تعیین کرد (Anderson., 2006). جونز و همکاران با بررسی انواع دهانه‌های ورودی در کالورت‌های جعبه‌ای شکل تاثیر دهانه ورودی کالورت را بر روی افت انرژی موضعی مشخص کردند (Jones et al., 2006). کوتوووسکی و همکاران در مورد ضریب افت انرژی ورودی و خروجی در لوله‌ها تحقیق کردند و نتیجه گرفتند که ضریب افت در ورودی لوله ثابت نیست (Kotowski et al., 2001). به هر حال کاربرد بسیاری از این نمودارها و جداول محدود به مواردی است که منطبق با فرضیات و شرایط توسعه و استخراج فرمول‌ها باشد و برای تمام موارد نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. از آن‌جا که اندازه‌گیری دقیق مقدار افت انرژی موضعی موجب بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های کالورت می‌شود، بنابراین استفاده از روش‌های هوشمندی که بتواند این پارامتر را دقیق‌تر تخمین بزند ضروری به‌نظر می‌رسد. در دهه‌های اخیر روش‌های محاسباتی نرم (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network; ANN)، برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic Programming; GP)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM) و مدل‌های نرو-فازی (Nero fuzzy; NF)) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از پدیده‌های موجود در طبیعت بوده و هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارد. به عنوان مثال روش شبکه عصبی قدرت یادگیری و سرعت آموزش بالایی دارد، آموزش آن نسبتاً آسان‌تر می‌باشد و معمولاً دارای تخمین دقیق‌تری می‌باشد. با این حال نتایج حاصل از آن غیرصریح می‌باشد. در بین تمامی

روش‌های هوش مصنوعی، نتایج حاصل از روش GEP صریح و همراه با رابطه کاربردی است. تاکنون از روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای تخمین پارامترهای مختلفی استفاده شده است. مانند پیش‌بینی بارش- رواناب توسط کیسی و همکاران (Kisi et al., 2013)، مدل‌سازی دبی بار بستر در لوله‌های فاضلاب‌رو با شرایط مرزی متفاوت توسط روش‌نگر و قاسم‌پور (Roushangar and Ghasempour., 2017)، شبیه‌سازی نوسانات تراز آب توسط کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲). پیش‌بینی عمق آب‌های زیر زمینی توسط شبیری و کیسی (Shiri and Kisi., 2011)، پیش‌بینی سری زمانی دبی توسط ونگ و همکاران (Wang et al., 2009) و مدل‌سازی سری زمانی رودخانه توسط لوپس و وینرت (Lopes and Weinert., 2004). در تحقیق حاضر سعی گردیده تا کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن به‌عنوان روش فرامدل در تخمین ضریب افت انرژی موضعی سیستم‌های کالورت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین مدل‌های ورودی متفاوت بر اساس ۲ سناریو (افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر و افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی کالورت) تعریف گردید تا تاثیر مدل‌سازی متفاوت در تعیین ضریب افت انرژی موضعی مشخص گردد. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای موثر در تخمین این مشخصه مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

سری داده‌های مورد استفاده در تحقیق

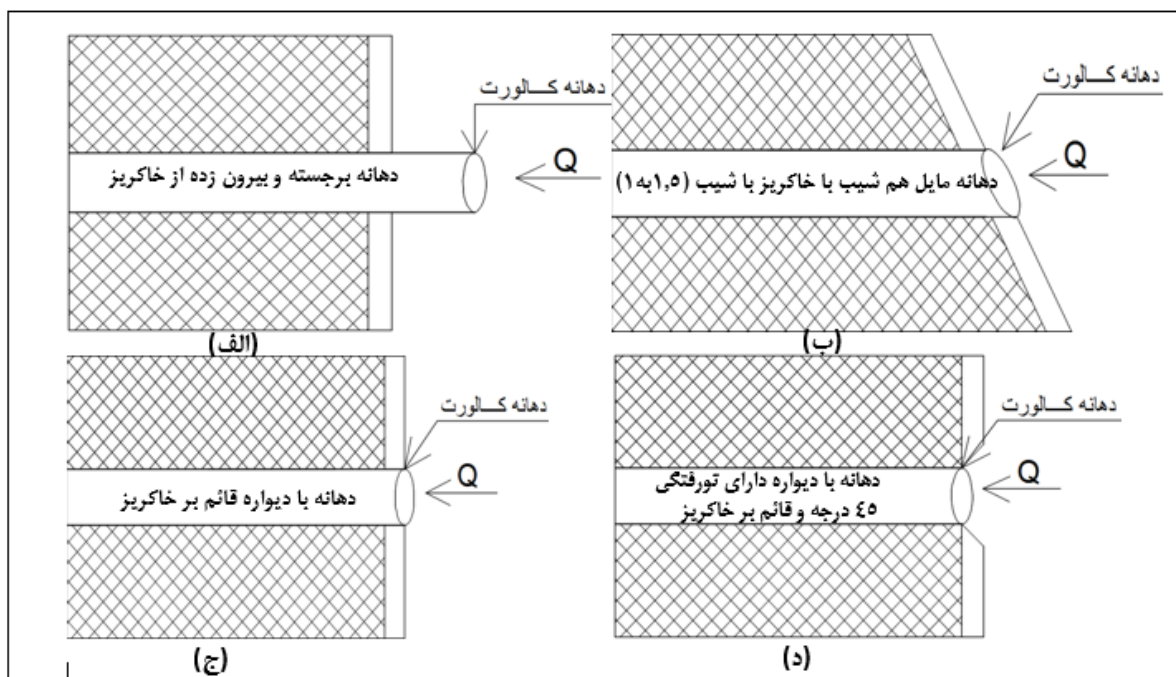
در تحقیق کنونی از داده‌های آزمایشگاهی مالون و پار و تولیس استفاده شده است. مالون و پار آزمایشاتی جهت اندازه‌گیری ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر کالورت‌های مستطیلی با ۵ زاویه مختلف انجام دادند (Malone and Parr., 2008) و تولیس آزمایشاتی به‌منظور اندازه‌گیری ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی کالورت در کالورت‌های نیمه‌مدفون دایروی شکل با چهار شکل متفاوت دهانه (شکل ۱ و ۲) انجام داد (Tullis., 2012). در جدول ۱ محدوده مشخصات هیدرولیکی و هندسی این آزمایشات نشان داده شده است.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

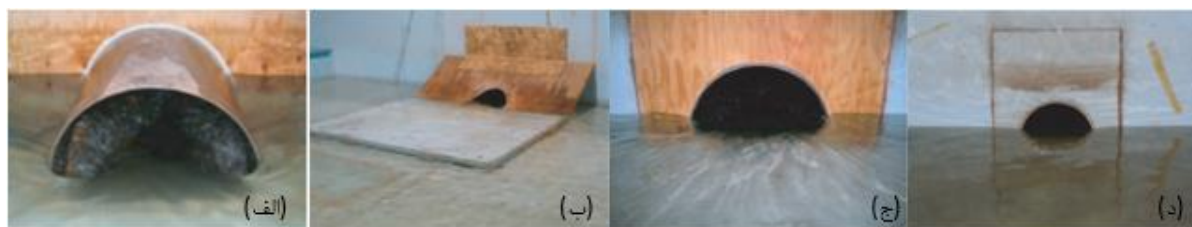
برنامه‌ریزی بیان ژن که توسعه یافته برنامه‌ریزی ژنتیک است توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ابداع شد (Ferreira., 2001). GEP روشی مناسب برای مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی و پیچیده است. این نوع الگوریتم افرادی کدگذاری شده به شکل کروموزوم‌های خطی با طول ثابت هستند. ساختار خطی کروموزوم‌ها موجب می‌شود استفاده از عملگرهای ژنتیکی نظیر جهش و ترکیب همیشه ساختارهای صحیح و معتبری تولید کند.

جدول ۱- محدوده داده‌های به کار رفته در آزمایش‌ها

تعداد داده‌ها	پارامترها				محقق	سناریو
	Re	Fr	θ (radian)	Ke		
۱۹۰	۴۲۱۳۸-۱۴۰۵۹۰	۰/۱۸۱-۰/۸۶	-۱/۵۷۸ -۰/۵۲۳	۰/۱۵۷-۱/۰۷۸	(Malon and Parr., 2008)	کالورت مستطیلی افت انرژی ناشی از وجود خم در مسیر
۶۶	۱۴۴۰۸-۳۰۲۷۱۱	۰/۰۱۲۴-۱/۰۵۸	-	۰/۱۵۷-۱/۰۲	(Tullis., 2012)	دهانه برجسته و بیرون زده از خاکریز
۶۵	۱۸۷۴۳-۲۶۸۰۴۳	۰/۰۱-۰/۸۱	-	۰/۴۲-۰/۹۳	(Tullis., 2012)	دهانه مایل هم شیب با خاکریز با شیب (۱ به ۵)
۴۵	۹۶۱۶-۳۰۵۴۶۹	۰/۴۲-۰/۹۷	-	۰/۳-۰/۶	(Tullis., 2012)	دهانه با دیواره قائم بر خاکریز
۴۸	۷۹۱۷۵-۲۹۲۲۴۰	۰/۰۴۹-۱/۰۵	-	۰/۲۲-۰/۳۸	(Tullis., 2012)	دهانه با دیواره دارای تورفتگی ۴۵ درجه و قائم بر خاکریز



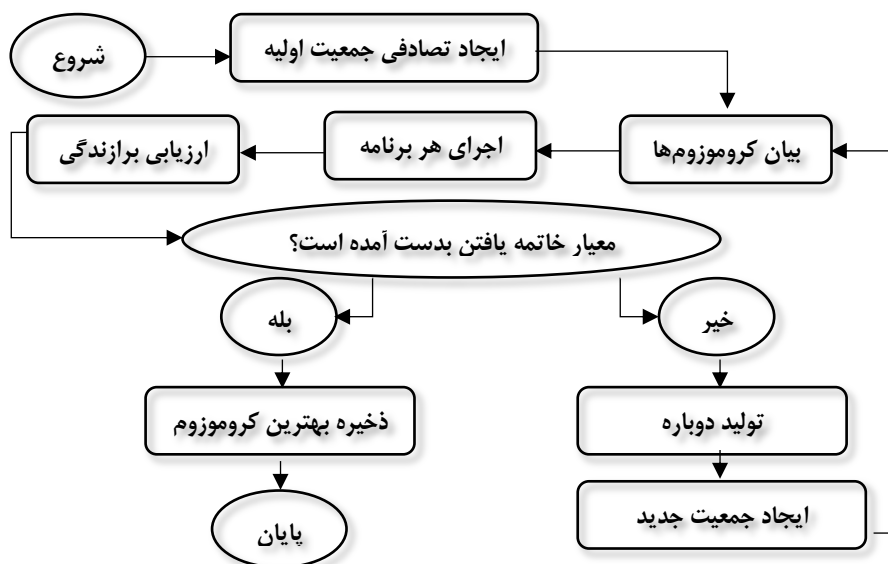
شکل ۱- شماتیک دهانه‌های ورودی کالورت دایروی در سناریو ۲؛ الف) دهانه برجسته و بیرون زده از خاکریز، ب) دهانه مایل هم شیب با خاکریز با شیب (۱ به ۵)، ج) دهانه با دیواره قائم بر خاکریز، د) دهانه با دیواره دارای تورفتگی ۴۵ درجه و قائم بر خاکریز (Tullis, 2012)



شکل ۲- دهانه‌های ورودی مختلف کالورت‌های آزمایش شده تحت سناریو ۲؛ الف) دهانه برجسته و بیرون زده از خاکریز، ب) دهانه مایل هم شیب با خاکریز با شیب (۱ به ۵)، ج) دهانه با دیواره قائم بر خاکریز، د) دهانه با دیواره دارای تورفتگی ۴۵ درجه و قائم بر خاکریز؛ (Tullis, 2012)

شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می-شود، فرآیند با تولید تصادفی کروموزومها از تعداد معینی از افراد (جمعیت اولیه) آغاز می‌شود. سپس این کروموزومها به صورت بیان درختی (ETS) اظهار می‌شوند و میزان برازندگی هر فرد در مقابل مجموعه‌ای از برازشها، ارزیابی می‌گردد. سپس افراد بر اساس عملکردشان، انتخاب می‌شوند تا با اصلاحات و بهبودهایی دوباره ساخته شوند و در نتیجه فرزندان با ویژگی‌های جدید باقی می‌گذارند. این فرزندان جدید، در یک چرخه تحت همان فرآیند توسعه‌ای قرار می‌گیرند (یعنی: بیان ژنوم، مواجهه با انتخاب محیط، انتخاب بر مبنای برازش، و تولید مثل با بهبود). این فرآیند برای تعداد معینی از نسلها تکرار می‌شود تا راه حل خوب و مناسبی پیدا شود. قسمت تولید مثل، شامل تکثیر و اصلاحات ژنتیکی و تکثیر عملیاتی است که چندین فرد مناسب از نسل حاضر را برای نسل بعد نگه می‌دارد. در طول تکثیر، ژنوم کپی شده و به نسل بعد انتقال داده می‌شود.

در برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) اولین مرحله، تولید جمعیت اولیه از راه حلها است. سپس کروموزومها بصورت بیان درختی (ETS) نشان داده شده، که این مرحله نیز مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین گردد. اگر کیفیت رضایت بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسلها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف ایجاد نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود (به معنای نخبه‌گزینی است) و بقیه راه حلها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شوند. گزینش یا انتخاب، نقش بقا شایستگی را انجام می‌دهد و بر اساس آن بهترین افراد شانس بهتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز بطور متوسط بهبود یابد (Ferreria., 2004). راه حل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن بطور



شکل ۳- شماتیک برنامه‌ریزی بیان ژن

افت ناشی از فشردگی مقطع: این افت در نتیجه کاهش تدریجی یا ناگهانی سطح مقطع بوجود آمده (بطور مثال: دهانه کالورت) که با افزایش سرعت همراه است.
افت ناشی از موانع: مانند شیرها و دریچه‌ها که یا سطح مقطع را تغییر داده یا باعث تغییر جهت جریان می‌شوند و در نتیجه سرعت به طور ناگهانی افزایش یا کاهش می‌یابد.
افت ناشی از زانوها یا انحنای زانوها: زانوها و انحناها قطع نظر از هر زاویه و یا شعاع انحنایی که دارند، هر تغییری در شعاع یا زاویه آن‌ها با تغییر سرعت همراه خواهد بود.

رابطه محاسبه افت انرژی موضعی

در خطوط انتقال سیالات در برخی نقاط سرعت جریان از لحاظ مقدار و جهت تغییر می‌کند. این تغییر سرعت می‌تواند ناشی از انبساط یا انقباض مقطع باشد یا در اثر وجود خمها (زانویی‌ها) و یا سایر اتصالات رخ دهد. در این حالت مقداری از افت انرژی جریان تلف می‌شود که به آن افت انرژی موضعی گفته می‌شود. افت‌های موضعی به ترتیب عبارتند از:

افت ناشی از بزرگ شدن سطح مقطع: این افت در نتیجه افزایش سطح مقطع به وجود آمده و با کاهش سرعت همراه خواهد بود.

هم‌چنین آزمایشات تجربی انجام گرفته توسط تولیس (Tullis., 2012) و آزمایشات انجام گرفته توسط رابینسون (Robinson., 2005) نشان می‌دهد که پارامترهای که می‌تواند بر ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی تأثیر بگذارد بصورت زیر (۶) می‌باشد.

$$f(\text{Fr}, \text{Re}, \frac{Hw}{D})=0 \quad (۶)$$

که در آن Fr ، Re ، $\frac{Hw}{D}$ به ترتیب عدد فرود جریان در داخل سازه کالورت، عدد رینولدز و نسبت عمق آب به قطر کالورت می‌باشد. در تحقیق کنونی سعی گردیده مدل‌های متفاوت تحت دو سناریو به صورت، افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر کالورت و افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی کالورت تعریف شوند. لازم به توضیح است در سناریو ۱ مدل‌ها با مقادیر عدد فرود مربوط به سه مقطع جریان (پایین‌دست خم، خود خم، بالادست خم) بصورت $Fr_{\text{downstream}}$ و Fr_{avrage} و Fr_{upstream} تعریف شده‌اند. هم‌چنین در سناریو ۱ مدل‌ها یک بار فقط وابسته به پارامتر هیدرولیکی و بار دیگر وابسته به پارامتر هیدرولیکی و مشخصات هندسی تعریف گردیدند و در سناریو ۲ مدل‌ها برای ۴ نوع دهانه ورودی بصورت جداگانه یک‌بار فقط بصورت تابعی از پارامترهای هیدرولیکی (عدد رینولدز و عدد فرود در داخل کالورت) و بار دیگر بصورت تابعی از پارامترهای هیدرولیکی و $\frac{Hw}{D}$ (نسبت عمق آب به قطر کالورت) تعریف گردیدند و در آخر جهت بررسی کارایی روش بکار رفته برای محدوده وسیعی از داده‌ها با شرایط متفاوت، مجموع داده‌های هر چهار دهانه ورودی در سناریو ۲ یک‌بار بصورت دو به دو و یک‌بار بصورت کلی با یکدیگر ترکیب گردیده و این حالت نیز مورد بررسی قرار گرفت. در تعیین ورودی مدل‌ها از پارامترهای بی‌بعد استفاده گردید. شکل ۴ شماتیک سناریوهای مورد استفاده را نشان می‌دهد. در شکل ۴ و در بخش سری داده‌های ترکیبی دو شاخه اول مربوط به ترکیب داده‌های مربوط به دو دهانه ورودی متفاوت با هم است. بدین صورت که داده‌های موجود در هر ۴ دهانه هر بار ۲ به ۲ با هم ترکیب گشته و نتیجه آرایه شده است و دو شاخه دوم ترکیب داده‌های هر ۴ دهانه با یکدیگر می‌باشد. هم‌چنین جدول ۲ بیانگر مدل‌های تعریف شده می‌باشد.

پارامترهای مدل GEP

روند تعیین مدل‌های تخمین ضریب افت انرژی موضعی با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن شامل ۵ مرحله می‌باشد. که به ترتیب عبارتند از تعیین تابع برازش، انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها، انتخاب تابع پیوند و انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن‌هاست. مجموعه ترمینال‌های به کار رفته در این تحقیق، متغیرهای مستقل

افت انرژی موضعی در سیستم‌های کالورت به صورت حاصل-ضرب یک ضریب تلفات در انرژی سرعت در داخل کالورت طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود. (Tullis., 2012) و (Malon and Parr., 2008)

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (۱)$$

در این رابطه افت انرژی موضعی کالورت، V سرعت متوسط درون کالورت، g شتاب گرانشی و K ضریب افت انرژی موضعی بوده که بصورت تجربی و از طریق آزمایش بدست می‌آید و به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

در این تحقیق به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها از سه پارامتر آماری استفاده گردید که عبارتند از: R ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، (DC) همبستگی خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی و $(RMSE)$ ریشه میانگین مربعات خطاها. هرچه مقدار R و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار $RMSE$ برای یک مدل کوچک‌تر باشد به معنی مطلوب بودن آن مدل می‌باشد. روابط این پارامترهای آماری به صورت رابطه ۲ تا ۴ می‌باشد.

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (L_{mi} - \bar{L}_m) \times (L_{pi} - \bar{L}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_{mi} - \bar{L}_m)^2 \times \sum_{i=1}^N (L_{pi} - \bar{L}_p)^2}} \right) \quad (۲)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (L_{mi} - L_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (L_{mi} - \bar{L}_m)^2} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(L_{mi} - L_{pi})^2}{N}} \quad (۴)$$

L_m : ضریب افت انرژی موضعی اندازه‌گیری شده، \bar{L}_m : متوسط ضریب افت انرژی موضعی اندازه‌گیری شده، L_p : ضریب انرژی موضعی شبیه‌سازی شده، \bar{L}_p : متوسط ضریب افت انرژی شبیه‌سازی شده، N : تعداد داده‌ها.

تعیین ورودی مدل‌ها

انتخاب مدل‌های ورودی در سیستم‌های هوشمند می‌تواند بر روی جواب‌های حاصل از تحلیل تأثیر بگذارد بنابراین سعی گردید در مدل‌سازی، پارامترهای مناسب و موثر انتخاب گردند. آزمایشات تجربی انجام گرفته توسط مالون و پار نشان می‌دهد پارامترهای مهمی که می‌تواند بر ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر در داخل کالورت تأثیر بگذارد به صورت زیر (۵) می‌باشد.

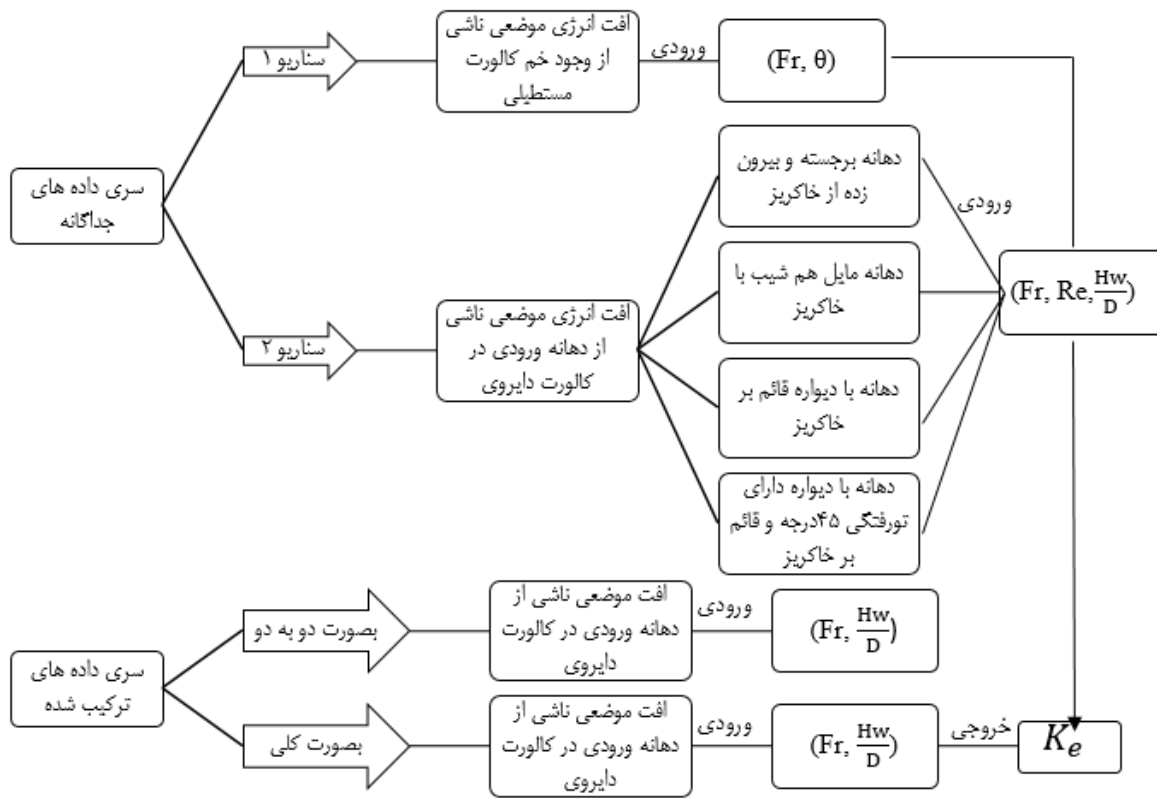
$$f(\text{Fr}, \theta)=0 \quad (۵)$$

که در آن θ زاویه خم در مسیر و Fr عدد فرود جریان می‌باشد. عدد فرود در ۳ مقطع جریان در درون کالورت بررسی گردیده است. مقدار فرود در بالادست خم، فرود در خود خم و فرود در پایین‌دست خم.

این پارامترها مدل اجرا شد و معیار ارزیابی خطای مدل (RMSE) محاسبه گردید. مشاهده گردید که مدل با تعداد کروموزوم‌های ۳۰، تعداد ژن ۳ و اندازه سر برابر با ۷ خطای کم‌تری را ارائه می‌دهد. هم-چنین تابع پیوند جمع نسبت به تابع ضرب منجر به نتایج دقیق‌تری گردید.

شامل پارامترهای موثر در تخمین ضریب افت انرژی موضعی می-باشند.

عملگرهای استفاده شده نیز شامل $-$ ، $+$ ، $/$ و \times به عنوان عملگر اصلی و \sqrt{x} ، $\tan(x)$ ، $\cos(x)$ ، $\sin(x)$ ، x^2 ، x^3 به عنوان عملگر فرعی می‌باشند. تعداد کروموزوم‌ها برابر با ۲۵، ۳۰ و ۳۵ و اندازه سر برابر با ۷ و ۸ و تعداد ژن‌ها ۳ و ۴ انتخاب گردید و برای ترکیب مختلف



شکل ۴- شماتیک سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۲- مدل‌های تعریف شده GEP

سناریو ۲		سناریو ۱	
افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی		افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر	
ترکیب داده‌های چهار دهانه کالورت		کالورت مستطیلی	
متغیرهای ورودی	مدل	متغیرهای ورودی	مدل
$Fr, \frac{H_w}{D}$	M(I)	$Fr_{downstream}$	D(I)
		$Fr_{downstream}, \theta$	D(II)
		$Fr_{average}$	A(I)
		$Fr_{average}, \theta$	A(II)
		$Fr_{upstream}$	U(I)
		$Fr_{upstream}, \theta$	U(II)

و خطا تعیین می‌گردد. جدول ۳ پارامترهای بهینه مدل‌های GEP به کار رفته در تحقیق را نشان می‌دهد. کل داده‌های موجود برای تخمین ضریب افت موضعی ناشی از وجود خم در مسیر ۱۹۰ داده و برای تخمین ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی در کالورت با دهانه برجسته ۶۶ داده، دهانه مایل هم شیب با خاکریز ۶۵ داده، دهانه قائم بر خاکریز ۴۵ داده و دهانه دارای تورفتگی ۴۵ درجه و قائم بر خاکریز ۴۸ داده می‌باشد. در هنگام مدل‌سازی برای تمامی حالات از ۷۵٪ داده‌ها جهت آموزش و ۲۵٪ دیگر برای آزمودن مدل استفاده گردید.

یکی از مراحل مهم در تنظیم روش GEP انتخاب مناسب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن‌ها می‌باشد. این عملگرها شامل جهش، وارون‌سازی، ترانهش، ترکیب و جایگشت است. در عملگر ترکیب شاخه‌هایی که بطور تصادفی انتخاب شده‌اند، بین دو درخت والد، معاوضه می‌شوند تا فرزند جدیدی بوجود آید. عملگر جهش گرهی را در درخت تجزیه انتخاب می‌کند و شاخه زیرین را با شاخه جدید تولید شده عوض می‌کند. در طی فرآیند جایگشت، جای متغیرهای یک تابع که بطور تصادفی انتخاب شده است، با هم عوض می‌شوند. در GEP، دو عملگر ترانهش وجود دارد: IS و RIS (ریشه IS). میزان احتمال این عملگرهای ژنتیکی توسط کاربر در حین اجرای مدل به صورت سعی

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های GEP استفاده شده در این تحقیق

تنظیمات پارامتر	پارامتر
تنظیمات توابع	$\cos(x)$, $\sin(x)$, $\tan(x)$, $\sqrt{\quad}$, X^2 , X^3 , $-$, $+$, $\sqrt{\quad}$, \times
تعداد کروموزومها	۳۰
اندازه سر	۷
تعداد ژن در هر کروموزوم	۳
تابع پیوند	جمع
معیار خطای تابع	ریشه میانگین مربعات خطاها
نرخ جهش	۰/۰۴۴
نرخ ترانهش درج متوالی و ریشه درج	۰/۱
نرخ ترکیب تک و دو	۰/۳
نرخ ترکیب و ترانهش ژن	۰/۱

نتایج و بحث

جهت تعیین ضریب افت انرژی موضعی در سیستم‌های کالورت و بررسی تأثیر پارامترهای متفاوت و هم‌چنین اثر ترکیب داده‌ها از دو سناریو، تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر (سناریو ۱) و تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی کالورت (سناریو ۲) به‌عنوان مدل استفاده گردید.

مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۱

سناریو ۱ بیانگر ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر کالورت مستطیلی می‌باشد. در این حالت مدل‌های وابسته به مشخصات هیدرولیکی جریان (عدد فرود) با مقادیر عدد فرود مربوط به ۳ مقطع در کالورت ($Fr_{upstream}$ و $Fr_{average}$ و $Fr_{downstream}$) و مشخصات هندسی کالورت (زاویه خم در مسیر) برای تعیین ضریب افت انرژی موضعی کالورت تعریف گردید. نتایج آنالیز مدل‌های GEP تحت سناریو ۱ در جدول ۵ و شکل ۴ آورده شده است. مطابق با جدول ۵ مشاهده می‌گردد، مدل‌های وابسته به مشخصه هیدرولیکی

جریان و مشخصه هندسی کالورت (زاویه خم) با پارامترهای ورودی (Fr , θ)، با توجه به این که DC و R بیش‌تر و RMSE کم-تری دارند، نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیش‌تری برخوردار هستند و استفاده از عدد فرود مربوط به پایین‌دست با معیارهای ارزیابی (R, DC, RMSE) برابر با (۰/۰۷۴، ۰/۹۴۳، ۰/۹۷۲) منجر به جواب‌های نسبتاً دقیق‌تری می‌گردد. شکل ۴ نمودار داده‌های مشاهداتی و محاسباتی سری داده‌های تست را برای این مدل‌ها نشان می‌دهد. به طور کلی از نتایج بدست آمده مشخص است که تنها استفاده از پارامترهای مربوط به مشخصات جریان به عنوان ورودی مدل‌ها، نمی‌تواند مطابقت مناسبی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نشان دهد و افزودن پارامتر θ (زاویه خم) به عنوان پارامتر ورودی سبب افزایش کارایی مدل‌های در نظر گرفته شده می‌شود. نکته مهم در مورد برنامه‌ریزی بیان ژن ارایه فرمول صریح در مورد پدیده مورد بررسی می‌باشد. با توجه به ماهیت روش GEP که در هر بار اجرا فرمول جدیدی ارایه می‌دهد جهت استخراج فرمول بهینه، مدل‌های تعریف شده هر کدام باید چندین بار اجرا گردیده و در هر اجرا دقت

مدل ارزیابی گردد و در نهایت فرمول بهینه‌ای که کم‌ترین خطا را دارا باشد ارائه گردد. در GEP هر کروموزوم ترکیبی از یک یا چند ژن می باشد که هر کدام بصورت ریز درختی بیان می‌شوند و در نهایت با هم ترکیب شده و بیان درختی پیچیده‌تری را تشکیل می‌دهند. از روش - های ترکیب این ژن‌ها استفاده از توابع پیوند می‌باشند. هم‌چنین با بررسی عملگرهای مختلف، مشاهده شد عملگرهای $+$ ، $-$ ، \times ، \div

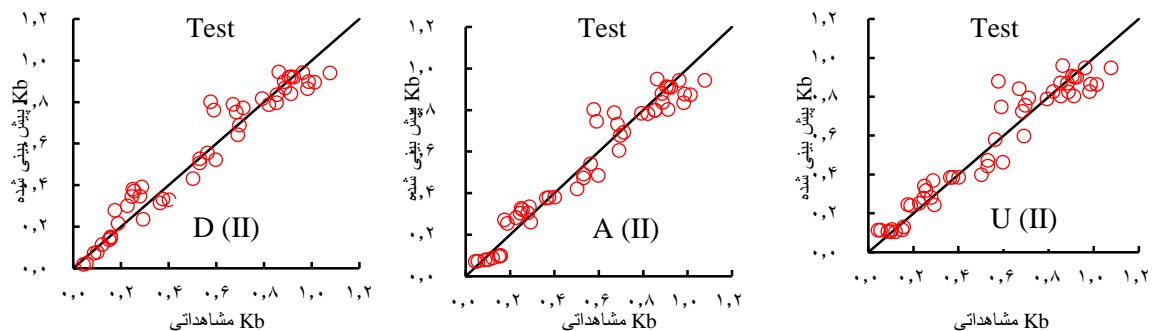
مدل ارزیابی گردد و در نهایت فرمول بهینه‌ای که کم‌ترین خطا را دارا باشد ارائه گردد. در GEP هر کروموزوم ترکیبی از یک یا چند ژن می باشد که هر کدام بصورت ریز درختی بیان می‌شوند و در نهایت با هم ترکیب شده و بیان درختی پیچیده‌تری را تشکیل می‌دهند. از روش - های ترکیب این ژن‌ها استفاده از توابع پیوند می‌باشند. هم‌چنین با بررسی عملگرهای مختلف، مشاهده شد عملگرهای $+$ ، $-$ ، \times ، \div

جدول ۴- روابط بدست آمده مدل برتر GEP مربوط به بررسی ضریب افت انرژی با فرود پایین دست و زاویه θ

پارامترهای ورودی	رابطه
$Fr_{downstream}, \theta$	$Ke = \sqrt{\frac{\theta^2}{0.023+Fr}} + [(cos\theta + Fr^3)^2 \times \sin(\tan\theta)] + [\tan(-0.0073Fr)]$ (۷)

جدول ۵- نتایج مربوط به مدل‌های GEP تحت سناریو ۱

معیارهای ارزیابی						مدل‌های GEP	حالت
Test			Train			کالورت مستطیلی	
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R		
۰/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۱۱۲	۰/۳۰۲	$Kb=f(Fr_{downstream})$	D(I) بررسی ضریب افت انرژی موضعی با مقادیر فرود در پایین دست خم.
۰/۰۷۴	۰/۹۴۳	۰/۹۷۲	۰/۰۶۴	۰/۹۴۷	۰/۹۷۳	$Kb=f(Fr_{downstream}, \theta)$	D(II)
۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۴۸۸	۰/۲۶	۰/۴۷۱	۰/۵۹	$Kb=f(Fr_{average})$	A(I) بررسی ضریب افت انرژی موضعی با مقادیر فرود در خم (میانه مسیر).
۰/۰۷۵	۰/۹۴۲	۰/۹۷۱	۰/۰۶۵	۰/۹۴۵	۰/۹۷۳	$Kb=f(Fr_{average}, \theta)$	A(II)
۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۴۲۵	۰/۶۵۲	$Kb=f(Fr_{upstream})$	U(I) بررسی ضریب افت انرژی در موضعی با مقادیر فرود بالادست خم.
۰/۰۸۶	۰/۹۲۶	۰/۹۶۲	۰/۰۷۴	۰/۹۳	۰/۹۶۵	$Kb=f(Fr_{upstream}, \theta)$	U(II)



شکل ۵- مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش‌بینی شده داده‌های تست تحت سناریو ۱

در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده مدل با ورودی‌های $(Fr, \frac{H_w}{D})$ ، با توجه به سه معیار ارزیابی (R, DC, RMSE) نسبت به دیگر مدل‌ها دقت بالاتری داشته و مدل برتر می‌باشد. از نتایج حاصل در جدول ۶ چنین به نظر می‌رسد که تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی

مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۲

جهت تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی در کالورت دایروی سناریو ۲ تعریف گردید. مدل‌های تعریف شده برای هر ۴ نوع هندسه دهانه ورودی (شکل ۱ و ۲) به صورت جداگانه تعریف شد. نتایج کلی مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۲

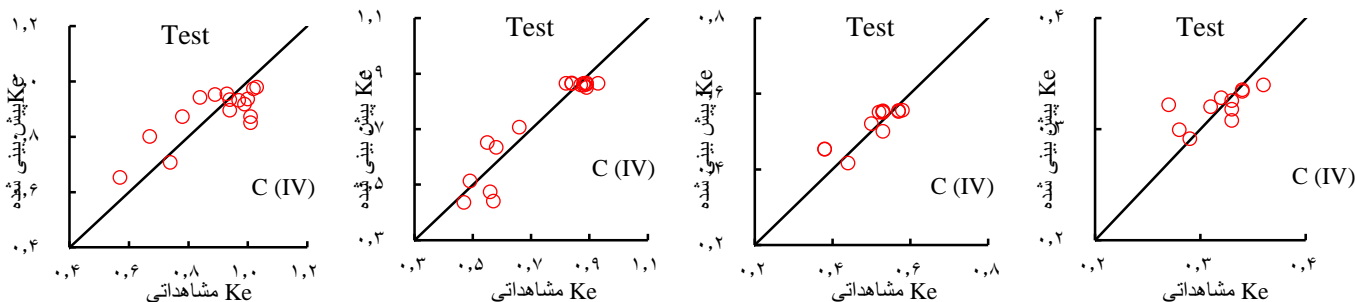
ترکیب داده‌ها

با ترکیب داده‌های موجود برای مدل برتر چهار نوع دهانه ورودی در سناریو ۲ (افت موضعی ناشی از دهانه ورودی) یک بار بصورت دو به دو و یک بار بصورت کلی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای محدوده وسیعی از داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۸ شامل تحلیل چندین مدل از سناریو ۲ برای این حالت می‌باشد. با مقایسه نتایج جدول ۸ با جدول ۶، مشاهده می‌شود که مدل‌های GEP برای داده‌های ترکیب شده نسبت به حالتی که سری داده‌ها بصورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، نتایج مطلوبی را نشان نداده و ترکیب کردن داده‌ها دارای دقت کافی جهت تخمین ضریب افت انرژی موضعی در کالورت نمی‌باشد. این نکته به ویژه در ترکیب داده‌های هر چهار حالت دهانه ورودی طبق جدول ۸ قابل مشاهده است.

فقط با پارامترهای ورودی Fr یا Re منجر به جواب‌های مطلوبی نمی‌گردد و لحاظ کردن پارامتر نسبت عمق جریان به قطر کالورت، در مدل‌های تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی کالورت موجب بهبودی جواب‌ها می‌گردد. هم‌چنین با توجه به سه معیار ارزیابی، مشاهده شده که مدل‌های مربوط به دهانه مایل هم-شیب با خاکریز با مقادیر (RMSE, DC, R) برابر با (۰/۹۲, ۰/۰۴, ۰/۹۶۲) دارای دقت بالاتری نسبت به مدل‌های مربوط به سایر دهانه‌ها می‌باشند. مدل‌های تعریف شده در GEP چندین بار اجرا گردید، در هر اجرا مدل ارزیابی شد و در آخر فرمول بهینه‌ای که دارای کم‌ترین خطا بود ارائه شد. فرمول‌های بدست آمده برای محاسبه ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی مربوط به هر ۴ نوع دهانه ورودی در جدول ۷ بیان شده است:

جدول ۶- نتایج مربوط به مدل‌های برتر GEP مربوط به ضریب افت موضعی ناشی از دهانه ورودی تحت سناریو ۲

معیارهای ارزیابی						مدل GEP		حالت
Test			Train					
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R	کالورت با دهانه برجسته و بیرون‌زده از خاکریز		
۰/۰۹	۰/۵۹۲	۰/۶۱۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۶۲	C(I)	Ke=f (Re)	
۰/۰۸	۰/۶۲	۰/۷۹	۰/۰۵۸	۰/۷۲	۰/۸۳	C(II)	Ke=f (Re, $\frac{H_w}{D}$)	
۰/۰۸	۰/۳	۰/۵۹۳	۰/۰۷۲	۰/۶۵۹	۰/۸۱۵	C(III)	Ke=f (Fr)	
۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۸۳	۰/۰۶	۰/۷۲	۰/۸۵	C(IV)	Ke=f (Fr, $\frac{H_w}{D}$)	
دهانه مایل هم‌شیب با خاکریز								
۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۸۲۶	۰/۰۸	۰/۷	۰/۸۴۳	C(I)	Ke=f (Re)	
۰/۰۵۷	۰/۸۸	۰/۹۶۲	۰/۰۴۶	۰/۹۲۴	۰/۹۶۴	C(II)	Ke=f (Re, $\frac{H_w}{D}$)	
۰/۰۶	۰/۸۲	۰/۹۰۸	۰/۰۷	۰/۸۲۲	۰/۹۱۱	C(III)	Ke=f (Fr)	
۰/۰۴	۰/۹۲	۰/۹۶۲	۰/۰۳۳	۰/۹۵	۰/۹۷۵	C(IV)	Ke=f (Fr, $\frac{H_w}{D}$)	کالورت دایروی شکل
دهانه با دیواره‌های قائم بر خاکریز								
۰/۰۴۵	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۰۴	۰/۶۴۱	۰/۸۱۶	C(I)	Ke=f (Re)	
۰/۰۳۹	۰/۶۴	۰/۸۶	۰/۰۳	۰/۷۸۱	۰/۸۸۳	C(II)	Ke=f (Re, $\frac{H_w}{D}$)	
۰/۰۳۶	۰/۵۵۲	۰/۸۱	۰/۰۳۵	۰/۶۶۱	۰/۸۲	C(III)	Ke=f (Fr)	
۰/۰۳۶	۰/۶۹۲	۰/۸۷۶	۰/۰۳	۰/۷۹۱	۰/۸۸۹	C(IV)	Ke=f (Fr, $\frac{H_w}{D}$)	
دهانه دارای تورفتگی ۴۵ درجه و قائم بر خاکریز								
۰/۰۳	۰/۴۷	۰/۶۶۴	۰/۰۲۵	۰/۵	۰/۶۸۷	C(I)	Ke=f (Re)	
۰/۰۲۵	۰/۶	۰/۶۸	۰/۰۲	۰/۶۳	۰/۷۵۳	C(II)	Ke=f (Re, $\frac{H_w}{D}$)	
۰/۰۲۶	۰/۴۸	۰/۶۱۴	۰/۰۲۵	۰/۵۸	۰/۷۳	C(III)	Ke=f (Fr)	
۰/۰۲۲	۰/۶۱	۰/۷۳	۰/۰۲	۰/۷۱	۰/۸	C(IV)	Ke=f (Fr, $\frac{H_w}{D}$)	



شکل ۶- مقایسه نتایج مشاهداتی و پیش‌بینی شده سری داده‌های تست تحت سناریو ۲

جدول ۷- روابط بدست آمده از GEP مربوط به بررسی افت انرژی در کالورت دایروی برای چهار شکل دهانه کالورت

روابط	پارامترهای ورودی
$Ke = \frac{(Fr^3 - \sin(Fr))^3}{\frac{Hw}{D}} + \frac{(1.36 - \sqrt{\frac{Hw}{D} + Fr})^3}{\frac{Hw}{D}} + \cos\left(\frac{Fr}{\cos(-0.0024(\frac{Hw}{D} - 0.13))}\right)$	$Fr, \frac{Hw}{D}$ کالورت مایل هم‌شیب با خاک‌ریز ریز B_1
$Ke = Fr - \left[\sin\left(\frac{\sin(\frac{Hw}{D})}{\frac{Hw}{D}}\right)^2 \right]^3 + \left[\tan\left(\cos\sqrt{\cos(-0.06 - Fr)}\right)^2 \right]^3 + \sin(\cos\sqrt{\sin Fr})^4$	$Fr, \frac{Hw}{D}$ کالورت با دهانه قائم بر خاک‌ریز ریز B_2
$Ke = \frac{\cos(\frac{Hw}{D} - 6.6)}{10.9 \frac{Hw}{D}} + \frac{\cos(\frac{Hw}{D})^3}{-24.9} + 0.017$	$Fr, \frac{Hw}{D}$ B_3
$Ke = \frac{Fr}{\left(\frac{Hw}{D} \times \frac{Hw}{D}\right) + (Fr - 8.4)} + \frac{19.71 - Fr^3}{87.52} + \left(\frac{1}{Fr}\right)^3$	$Fr, \frac{Hw}{D}$ B_4

کالورت با دهانه قائم و تورفتگی ۴۵ درجه

افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی) با حذف پارامتر $\frac{Hw}{D}$ خطای حاصل از اجرای مدل افزایش یافته است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سناریو ۱ پارامتر θ و در سناریو ۲ پارامتر $\frac{Hw}{D}$ تاثیر گذارترین پارامترها در تخمین ضریب افت انرژی موضعی هستند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت تخمین ضریب افت انرژی موضعی در سیستم‌های کالورت از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده گردید و تاثیر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بین مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۱ (افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر)، مدل‌هایی که از

تحلیل حساسیت

جهت بررسی تاثیر پارامترهای بکار رفته در مدل‌های برتر آنالیز حساسیت انجام گرفت. به عنوان نمونه، در مدل برتر سناریو ۱ (افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر) و یک مدل از مدل‌های برتر سناریو ۲ (افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی) از آنالیز حساسیت استفاده گردید. بدین منظور با حذف تک تک پارامترها از سری پارامترهای ورودی مدل برتر، مدل دوباره اجرا شد سپس با محاسبه سه معیار ارزیابی کارایی مدل (RMSE، DC، R) میزان تاثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به صورت جدول ۹ ارائه شده است. مطابق با این جدول مشخص است که در سناریو ۱ (افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر) با حذف پارامتر θ و در سناریو ۲

مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۱، اضافه کردن پارامتر θ سبب افزایش کارایی مدل‌ها در تمام حالت‌ها شده است که بیانگر تأثیر نسبتاً بالای θ در تخمین ضریب افت انرژی موضعی ناشی از وجود خم در مسیر می‌باشد.

پارامترهای (Fr, θ) به عنوان متغیرهای ورودی استفاده می‌کند در تخمین ضریب افت انرژی موضعی نسبت به مدل‌های دیگر دارای عملکرد بهتری می‌باشد و مدلی که در آن از فرود پایین دست استفاده شده دارای تخمین‌های نسبتاً دقیق‌تری با $(RMSE, DC, R)$ برابر با $(0/972, 0/943, 0/074)$ در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. بین

جدول ۸- نتایج مربوط به مدل‌های GEP برای ترکیب داده‌ها دهانه‌های مختلف در کالورت دایروی

معیارهای ارزیابی						مدل	حالت
Test			Train				
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R		
0/112	0/65	0/818	0/08	0/716	0/848	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه برجسته+ دهانه مایل هم‌شیب با خاک‌ریز
0/23	0/281	0/375	0/02	0/311	0/408	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه برجسته+ دهانه قائم بر خاک‌ریز
0/37	0/265	0/353	0/31	0/299	0/401	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه برجسته+ دهانه قائم دارای تورفتگی
0/14	0/36	0/567	0/13	0/45	0/669	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه مایل هم‌شیب با خاک‌ریز+دهانه قائم
0/19	0/207	0/337	0/23	0/29	0/44	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه مایل+ دهانه قائم دارای تورفتگی
0/1	0/27	0/302	0/09	0/28	0/333	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	دهانه قائم+ دهانه قائم دارای تورفتگی
0/24	0/29	0/285	0/22	0/266	0/38	$M(I) \quad Ke=f(Fr, \frac{Hw}{D})$	ترکیب تمام داده‌های چهار دهانه

کالورت
دایروی شکل

جدول ۹- تأثیر نسبی هر یک از پارامترهای ورودی مدل برتر هر حالت

معیارهای ارزیابی						پارامتر حذف شده	مدل برتر
Test			Train				
RMSE	DC	R	RMSE	DC	R		سناریو ۱
0/3	0/1	0/3	0/3	0/112	0/302	θ	D (II)
0/09	0/894	0/947	0/09	0/9	0/951	Fr	
0/09	0/69	0/973	0/03	0/944	0/974	Fr	سناریو ۲
0/06	0/62	0/908	0/07	0/822	0/911	Hw/D	C (IV)

دیگر مدل‌هایی که فقط از تک پارامترهای هیدرولیکی $(Fr$ و $Re)$ جهت تخمین ضریب افت انرژی موضعی استفاده می‌کنند موفق‌تر بوده و از دقت به نسبت بالاتری برخوردار می‌باشند در این سناریو

بین مدل‌های تعریف شده تحت سناریو ۲ (افت انرژی موضعی ناشی از دهانه ورودی)، که در تعیین مدل‌های آن از پارامترهای $(Re, Fr, \frac{Hw}{D})$ به عنوان متغیر ورودی استفاده شده است، نسبت به

06-138).

- Kisi, O., Shiri, J., Tombul, M. 2013. Modeling rain fall-runoff process using soft computing techniques. *Computers geosciences*, 51, 1018-117.
- Kotowski, A., Szewczyk, H., Ciezak, W. 2011. Entrance loss coefficients in pipe hydraulic systems. *Environment Protection Engineering*. 37.4: 105-117.
- Lopes, H.S., Weinert, W.R. 2004. EGIPSYS: an enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 14.3: 375-384.
- Malone, T.R., Parr, A.D. 2008. Bend losses in rectangular culverts. Kansas Department of Transportation. (No. K-TRAN: KU-05-5)
- Robinson, S.C. 2005. Hydraulic characteristics of a buried invert elliptical culvert inlet and quantification of culvert exit loss (Doctoral dissertation, Utah State University, Department of Civil and Environmental Engineering).
- Roushangar, K., Ghasempour, R. 2017. Estimation of bedload discharge in sewer pipes with different boundary conditions using an evolutionary algorithm. *International Journal of Sediment Research*. 32.4: 564_574
- Shiri, J., Kisi, O. 2011. Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. *Computers and geosciences*. 37.10: 1692-1701.
- Tullis, B.P. 2012. Hydraulic loss coefficients for culverts (R. 734). *Transportation Research Board*. 123p
- Tullis, B., Robinson, S., Young, J. 2005. Part 3: Hydrology, Hydraulics, and Water Quality: Hydraulic Characteristics of Buried-Invert Elliptical Culverts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1904: 104-112.
- Wang, W.C., Chau, K.W., Cheng, C.T., Qiu, L. 2009. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journals of Hydrology*. 374.3-4: 294-306.
- مدل هایی که در آن از پارامترهای ورودی $(Fr, \frac{H_w}{D})$ استفاده شده بود، نسبت به سایر مدل ها دارای دقت بالاتری بوده و مدل مربوط به دهانه ورودی مایل هم شیب با خاکریز با $(R, RMSE, DC)$ برابر با $(0.04, 0.92, 0.962)$ به عنوان مدل برتر شناسایی شد. بین مدل های تعریف شده تحت سناریو ۲، اضافه کردن پارامتر $\frac{H_w}{D}$ سبب بهبود جواب ها در تخمین ضریب افت انرژی موضعی شده است. مطابق با نتایج آنالیز حساسیت در سناریو ۱ پارامتر θ و در سناریو ۲ پارامتر $\frac{H_w}{D}$ تاثیر گذارترین پارامترها می باشند. آنالیز سری داده ها در سناریو ۲ در کالورت های دایروی به صورت جداگانه منجر به افزایش دقت پیش بینی نسبت به ترکیب دو به دو داده ها و ترکیب کلی داده ها می گردد و ترکیب کردن داده ها از کارایی مدل می کاهد.

منابع

کاوه کار، ش.، قربانی، م.، اشرف زاده، ا.، دربندی، ص. ۱۳۹۲. شبیه سازی نوسانات تراز آب با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز. ۴۳: ۷۲-۷۵-۶۹

Anderson, D.S. 2006. Inlet Loss Coefficients and Inlet Control Head-Discharge Relationships for Buried-Invert Culverts and Slip-Lined Culverts. Ph.D. Thesis: Utah State University, Logan, UT 113 pp.

Ferreira, C. 2001. Algorithm for solving gene expression programming: a new adaptive problems. *Complex systems*. 13.2: 87-129.

Ferreira, C. 2004. Gene expression programming and the evolution of computer programs. Recent developments in biologically inspired computing. 82-103.

Graziano, F., Martin, B., Stein, S., Umbrell, E. 2001. South Dakota culvert inlet design coefficients Turner-Fairbank Highway Research Center. (No. FHWA-RD-01-076).

Jones, J.S., Kerenyi, K., Stein, S. 2006. Effects of inlet geometry on hydraulic performance of box culverts. Federal Highway Administration (No. FHWA-HRT-

Prediction and determination of effective parameters of local energy loss in culvert systems, using intelligent evolutionary Algorithm

K. Roushangar^{*1}, G. Nassaji Matin²

Received: Mat.06, 2018

Accepted: May.11, 2018

A culvert is a hydraulically short conduit which conveys stream flow through a roadway or embankment. Culverts are available in many different shapes and in spite of their simple structure, the process of designing requires accurate calculations and they are controlled by many variables. Accurate estimation of the energy loss in culverts plays an important role in optimum designing of culvert systems. In this paper, in order to simulate the local energy loss coefficient in culverts with various geometries (circular and rectangular), several models with different inputs were defined. The optioned results proved the capability of GEP in predicting local energy loss coefficient in culvert systems. Also it was found that in order to estimate the bend loss coefficient, model with input parameters of (Fr, θ) and to estimate the entrance loss coefficient, models with input parameters of $(Fr, \frac{H_w}{D})$ led to more accurate outcomes. Sensitivity analyses showed that θ and $\frac{H_w}{D}$ had the key role in estimating bend loss and entrance loss coefficient.

Keywords: Culvert, Intelligent models, Gene Expression Programming, Minor Loss coefficient.

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- M.sc student, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: roshangari@ tabrizu.ac.ir)